

УДК 621.17

ТЕХНОЛОГИЯ ОСУШЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

В.В. Беспалов, В.И. Беспалов

Томский политехнический университет

E-mail: vic@tpu.ru

Приводится технология и схема установки по осушению дымовых газов с использованием тепла конденсации для подогрева воздуха и получения конденсата. Подогретый воздух используется для обогрева помещений и подачи в котел, что позволяет экономить топливо. Дана оценка эффективности использования промышленной установки. В статье приведены результаты расчетов параметров дымовых газов и воздуха, выполненные с помощью математической модели промышленной установки.

Ключевые слова:

Энергосбережение, конденсатор, теплообменник, тепловая электростанция, паровой котел, конденсация водяных паров, дымовые газы.

Key words:

Power savings, condenser, heat exchanger, thermal power plant, steam boiler, moisture condensation, combustion products.

В работе тепловых электростанций на природном газе, или другом углеводородном топливе можно выделить проблему использования больших потерь тепла с уходящими газами, заключенного в водяных парах, а также проблему, вызванную конденсацией водяных паров в газоходах и дымовой трубе. Высокое содержание водяных паров в продуктах сгорания при низких температурах наружного воздуха может приводить к конденсации водяных паров, что способствует разрушению конструкций. Образование конденсата в газоходах и дымовой трубе обусловлено тем, что дымовые газы при малых скоростях у поверхности стен успевают охладиться до точки росы. В условиях конкурентного рынка часть станций работает на пониженной мощности, а, следовательно, объем дымовых газов значительно меньше проектного и меньше скорость их течения в трубе.

В общем случае техническими решениями для предотвращения конденсации водяных паров в газоходах и трубе являются:

1. Повышение температуры продуктов сгорания на выходе из котла.
2. Улучшение теплоизоляции газоходов и дымовой трубы.
3. Увеличение скорости течения продуктов сгорания в газоходах и дымовой трубе.
4. Осушение дымовых газов.

Повышение температуры продуктов сгорания на выходе из котла на 20...30 °С снижает эффективность работы котла на 2...3 %, увеличивая потери тепла с уходящими газами. При современных ценах на топливо для котла производительностью 500 МВт годовая потеря может составить 10...15 млн р.

Защитная теплоизоляция дымовой трубы и газоходов позволяет уменьшить охлаждение дымовых газов настолько, чтобы их температура не достигала точки росы. Однако это требует значитель-

ных капитальных вложений и не всегда технически выполнимо.

Увеличение скорости течения дымовых газов в дымовой трубе без изменения самой трубы можно добиться путем подмеса к дымовым газам воздуха. Так тоже можно снизить температуру точки росы, но требуется значительный расход тепла на подогрев подмешиваемого воздуха.

Эти три рассмотренных решения являются затратными. Кроме того, во всех этих случаях с водяным паром в окружающую среду уходит значительное количество тепла (теплота парообразования).

Осушение дымовых газов обычно осуществляют в контактных экономайзерах котлов или в скрубберах дымового тракта, орошая дымовые газы водой [1, 2]. Это приводит существенному снижению не только абсолютной влажности дымовых газов, но и их температуры, что с одной стороны снижает самотягу трубы, а с другой не уменьшает величину относительной влажности дымовых газов. Последующий подогрев дымовых газов требует значительных затрат тепла.

Полезное использование большого количества тепла, выделяемого при конденсации, затруднено низкими параметрами и качеством воды на выходе из контактных теплообменников. Ранее считалось применение поверхностных теплообменных аппаратов экономически нецелесообразным из-за больших размеров [3, 4]. В своей работе мы полагаем необходимым оспорить это утверждение и предложить экономически выгодный вариант схемы с поверхностными теплообменными аппаратами.

Предлагается комплексный ресурсосберегающий подход к решению вышеизложенных проблем. Цель работы повысить эффективность работы ТЭС, а именно, снизить температуру уходящих газов, полезно использовать теплоту конденсации водяных паров, исключить конденсацию водяных паров в дымовой трубе. Разработана технология осушения дымовых газов с получением конденсата

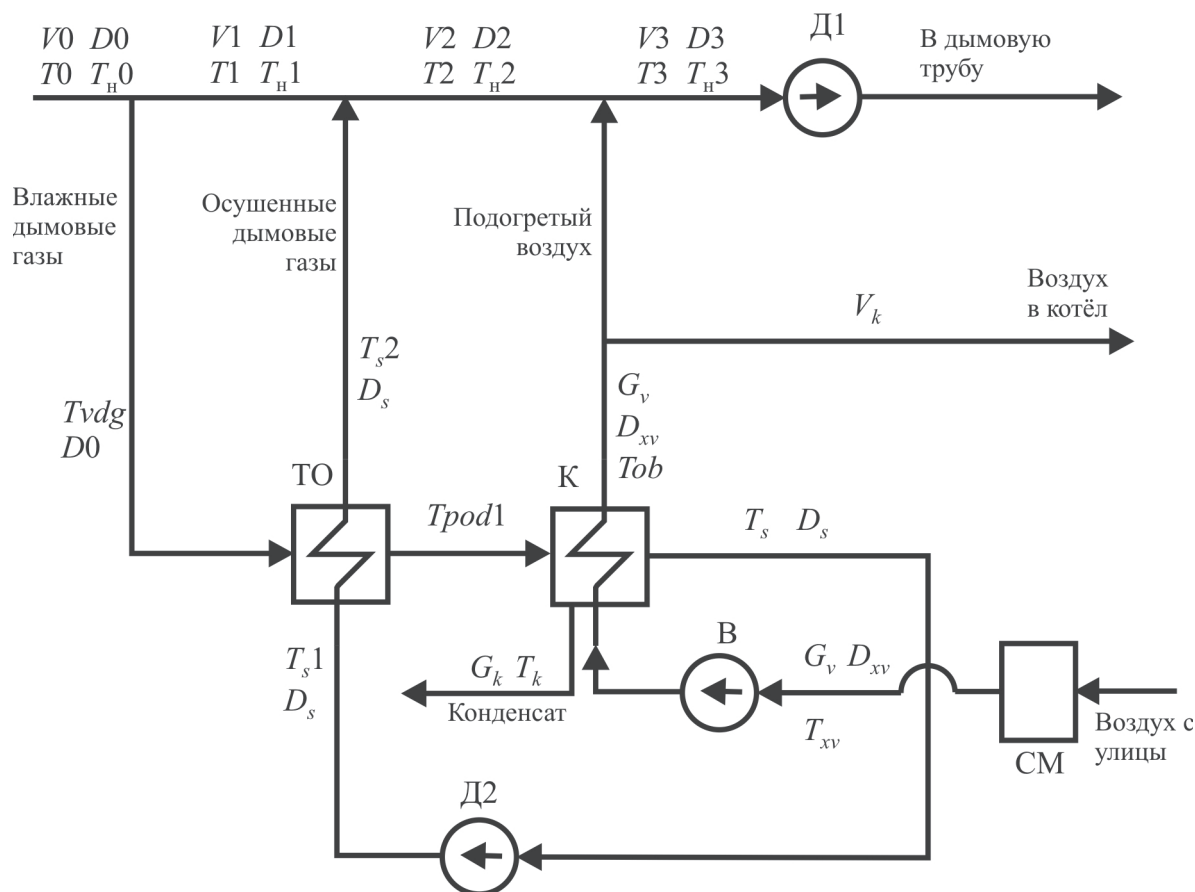


Рисунок. Технологическая схема установки осушения дымовых газов

и использованием тепла конденсации для подогрева воздуха. Этот конденсат после его дополнительной обработки может быть использован для восполнения потерь. Технологическая схема установки представлена на рисунке.

На схеме приняты следующие обозначения: V – объемный расход, $\text{м}^3/\text{кг}$; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; D – влагосодержание дымовых газов или воздуха, $\text{г}/\text{кг}$ с.г. (граммов на килограмм сухих газов); G – массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$.

Буквенные индексы обозначают: s – сухой газ; w – влага; n – насыщение; vdg – влажные дымовые газы; p – пар; xv – холодный воздух; k – конденсат. Цифровыми индексами обозначены потоки: 0 – до ответвления на ТО; 1 – после ответвления; 2 – после смешения с осушенными газами; 3 – после смешения с подогретым воздухом. Кроме того T_{ob} – температура подогретого воздуха, T_{pod1} – температура влажных дымовых газов на выходе из ТО.

Особенностью предлагаемой схемы является то, что в газовый тракт врезается отвод, по которому часть влажных дымовых газов (четверть) подается на осушающую установку, состоящую из двух теплообменников. Первый из них (ТО) по ходу дымовых газов предназначен для предварительного охлаждения влажных газов за счет нагрева осушенных. Второй теплообменник представляет собой

рекуперативный конденсатор (К), в котором при конденсации содержащихся в дымовых газах водяных паров происходит подогрев воздуха, забираемого из камеры смешения (СМ) вентилятором (В), до температуры $25...35^{\circ}\text{C}$. Часть нагретого воздуха в качестве приточной вентиляции подается в цех и, далее, в котел, остальное сбрасывается в дымоход.

Воздух забирается из атмосферы с температурой от -5 до -15°C . Если температура наружного воздуха ниже -15°C , то к нему необходимо подмешивать в камере смешения теплый воздух из конденсатора или непосредственно из цеха.

Штатный дымосос Д1 не сможет обеспечить перепад давлений, требуемый для преодоления аэродинамического сопротивления теплообменников ТО и К. Поэтому требуется установка дымососа Д2 нужного напора и производительности. Наиболее целесообразно Д2 устанавливать после конденсатора на сухие охлажденные дымовые газы.

Для теплового расчета схемы были взяты конкретные исходные данные Томской ТЭЦ-3 по котлу Е-500-13,8-560 (БКЗ-500-140). Температура влажных дымовых газов $T_0=130^{\circ}\text{C}$, расход дымовых газов $V_0=133,7 \text{ м}^3/\text{с}$, влагосодержание дымовых газов $D_0=125,6 \text{ г}/\text{кг}$ с.г., требуемый расход воздуха в котел $V_k=116 \text{ м}^3/\text{с}$. Температура наружного воздуха в расчетах варьировалась от 0 до -20°C с влагосодержа-

нием, соответствующим состоянию насыщения. Для определения конструктивных характеристик основных элементов установки по осушению дымовых газов была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка. Результаты проведенных экспериментов приведены в [5]. В экспериментах было установлено, что в конденсаторе может быть сконденсировано с учетом неравновесности процесса от 60 до 90 % водяных паров, содержащихся в дымовых газах. Решение уравнения теплового баланса для конденсатора показывает, что теплоты конденсации 0,1 кг пара, содержащегося в 1 м³ дымовых газов достаточно, чтобы нагреть 6...7 м³ воздуха на 30...35 °С. Поэтому для подогрева воздуха было принято решение взять лишь четвертую часть дымовых газов – 33,4 м³/с. Это обеспечит подогрев до 200 м³/с воздуха от –15 до +20 °С.

Расчеты конструкции теплообменных аппаратов проводились с помощью математической модели, реализованной в пакете MathCAD. В математической модели был заложен коэффициент равновесности процесса конденсации водяных паров из дымовых газов, который был получен экспериментально на лабораторной установке осушения дымовых газов на Томской ТЭЦ-3 [5]. Следует отметить, что этот коэффициент мало влияет на конструкцию аппаратов, но от него существенно зависит тепловая производительность конденсатора.

В качестве теплообменного оборудования на промышленной установке посчитали целесообразным применить пластинчатые теплообменники, изготовленные из оцинкованных листов железа толщиной 0,6 мм стандартным размером 1250×2500 мм. Как показали тепловые и конструкторские расчеты, поверхность теплообмена конденсатора для заданных условий должна составить 4960 м², а теплообменника – 3306 м². Суммарное гидравлическое сопротивление установки по воздуху не превышает 850 Па, а по дымовым газам – 1000 Па. Результаты расчетов установки на различные режимы представлены в таблицах. Предварительная стоимость изготовления установки, ее монтажа и наладки оценена в 10...11 млн р, эксплуатационные издержки – 1 млн р.

В табл. 1 приведены результаты расчета параметров работы установки при различных температурах холодного воздуха. Коэффициент равновесности процесса в конденсаторе k_p принят равным 0,8. Дымовые газы поступали в установку с температурой 130 °С в количестве 33,4 н·м³/с. Расчетный коэффициент избытка воздуха дымовых газов с влажностью 116 г/кг с.г. равен 1,3. Этому влажностному содержанию соответствует температура насыщения 55 °С. Холодный воздух в установку поступает в количестве 194,1 н·м³/с (250 кг/с). Под величиной Q_k в таблице приведены значения тепловой производительности конденсатора.

Режим работы установки при $T_{хв}$ равным –15 °С и принятыми выше исходными данными будем считать базовым для последующих расчетов.

Таблица 1. Результаты расчета параметров работы установки при различных температурах холодного воздуха

| $T_{хв}$, °С | Q_k , МВт | T_2 , °С | $T_{н2}$, °С | T_3 , °С | $T_{н3}$, °С | $T_{об}$, °С | $T_{с1}$, °С | G_k , кг/с | G_k , т/ч |
|---------------|-------------|------------|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
| 0 | 9,72 | 119,47 | 51,60 | 90,00 | 42,98 | 38,90 | 27,29 | 3,02 | 10,87 |
| –5 | 10,08 | 119,10 | 51,48 | 88,46 | 42,71 | 35,32 | 22,45 | 3,11 | 11,20 |
| –10 | 10,39 | 118,70 | 51,39 | 86,83 | 42,51 | 31,58 | 17,32 | 3,19 | 11,48 |
| –15 | 10,68 | 118,27 | 51,31 | 85,15 | 42,36 | 27,71 | 11,89 | 3,24 | 11,66 |
| –20 | 10,93 | 117,83 | 51,25 | 83,40 | 42,25 | 23,73 | 6,24 | 3,29 | 11,84 |

Таблица 2. Результаты расчета работы установки при различных возможных значениях коэффициента равновесности процесса в конденсаторе k_p

| k_p | Q_k , МВт | T_2 , °С | $T_{н2}$, °С | T_3 , °С | $T_{н3}$, °С | $T_{об}$, °С | $T_{с1}$, °С | G_k , кг/с | G_k , т/ч |
|-------|-------------|------------|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
| 1,0 | 12,51 | 120,04 | 50,26 | 88,78 | 41,33 | 35,04 | 25,30 | 4,06 | 14,62 |
| 0,9 | 11,59 | 119,16 | 50,80 | 86,96 | 41,85 | 31,37 | 18,47 | 3,65 | 13,14 |
| 0,8 | 10,68 | 118,27 | 51,31 | 85,15 | 42,36 | 27,71 | 11,86 | 3,24 | 11,66 |
| 0,7 | 9,74 | 117,52 | 51,82 | 83,39 | 42,86 | 23,96 | 7,09 | 2,84 | 10,24 |
| 0,6 | 8,81 | 116,71 | 52,31 | 81,62 | 43,34 | 20,25 | 1,92 | 2,43 | 8,75 |

Хорошо видно, что коэффициент равновесности процесса сильно влияет на тепловую производительность установки и на количество образующегося конденсата. Естественно, чем больше неравновесность процесса конденсации, тем сильнее переохлаждение дымовых газов в конденсаторе $T_{с1}$.

В табл. 3 приведены результаты расчетов при работе установки с температурой наружного воздуха –15 °С и коэффициентом равновесности процесса в конденсаторе $k_p=0,8$. Варьировалось количество воздуха, подаваемого в конденсатор.

Таблица 3. Результаты расчета работы установки при различном расходе воздуха в конденсатор

| G_v , кг/с | Q_k , МВт | T_2 , °С | T_3 , °С | $T_{н3}$, °С | $T_{об}$, °С | $T_{с1}$, °С |
|--------------|-------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| 150 | 10,17 | 121,14 | 120,91 | 51,24 | 52,84 | 48,83 |
| 170 | 10,26 | 121,12 | 113,07 | 49,05 | 45,38 | 38,47 |
| 190 | 10,39 | 119,87 | 104,74 | 47,11 | 39,73 | 29,95 |
| 210 | 10,51 | 119,24 | 97,53 | 45,37 | 35,04 | 22,90 |
| 230 | 10,60 | 118,71 | 91,02 | 43,80 | 31,10 | 16,96 |
| 250 | 10,68 | 118,27 | 85,15 | 42,36 | 27,70 | 11,86 |
| 270 | 10,72 | 118,02 | 79,90 | 41,04 | 24,70 | 8,98 |
| 290 | 10,77 | 117,75 | 75,08 | 39,83 | 22,13 | 5,84 |
| 310 | 10,81 | 117,53 | 70,71 | 38,70 | 19,86 | 3,20 |

Как видно из расчета, снижение расхода воздуха в два раза приводит к снижению тепловой производительности установки всего на 10 %. Это объясняется тем, что снижение коэффициента теплоотдачи от стенки к воздуху в большей степени компенсируется увеличением температурного напора. Однако увеличение расхода воздуха значительно снижает температуру точки росы дымовых газов после их смешения с сухим теплым воздухом. Следует отметить, что для осушенных дымовых газов температура точки росы равна 30,75 °С. Поэтому дальнейшее увеличение расхода воздуха через конденсатор может привести к тому, что дымовые газы будут пересыщены влагой, содержащейся в

них в виде тумана, которая начнет оседать в газоходах на стенках.

Таблица 4. Влияние начальной температуры дымовых газов на работу установки

| $T_0, ^\circ\text{C}$ | $Q_k, \text{МВт}$ | $T_2, ^\circ\text{C}$ | $T_3, ^\circ\text{C}$ | $T_{об}, ^\circ\text{C}$ | $T_{г1}, ^\circ\text{C}$ |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 150 | 11,22 | 135,80 | 97,09 | 29,90 | 10,65 |
| 130 | 10,68 | 118,30 | 85,15 | 27,70 | 11,86 |
| 110 | 10,12 | 100,80 | 73,24 | 25,47 | 15,05 |
| 90 | 9,58 | 83,17 | 61,28 | 23,30 | 18,20 |

В табл. 4 видно, как влияет на работу установки изменение начальной температуры дымовых газов, если расход воздуха и его наружная температура остаются постоянными. Исходные данные при расчете схемы приняты такими же, как и при расчете, результаты которого приведены в табл. 1.

В табл. 5 показано, как меняются параметры дымовых газов при эксплуатации установки осушения на расчетных параметрах. Здесь видно, что предварительное осушение одной четверти дымовых газов приводит к снижению температуры точки росы всего потока после смешения всего на $3,7^\circ\text{C}$, тогда как подмешивание сухого нагретого воздуха к дымовым газам снижает их влагосодержание до $56,8 \text{ г/кг с.г.}$, а температуру точки росы до $42,4^\circ\text{C}$.

Таблица 5. Изменение параметров дымовых газов в дымовом тракте

| Параметры дымовых газов | $T, ^\circ\text{C}$ | $V, \text{м}^3/\text{с}$ | $D, \text{г/кг с.г.}$ | $T_{р}, ^\circ\text{C}$ |
|--|---------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Исходный поток влажных дымовых газов | 130,0 | 133,7 | 116,3 | 55,0 |
| После отбора дымовых газов на осушение | 130,0 | 100,3 | 116,3 | 55,0 |
| После подмеса осушенных дымовых газов | 118,3 | 129,7 | 94,4 | 51,3 |
| После подмеса нагретого воздуха | 85,1 | 207,9 | 51,3 | 42,4 |

Приведем оценку экономической эффективности эксплуатации предлагаемой установки для условий г. Томска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
2. Свиридов Н.Ф., Свиридов Р.Н., Ивуков И.Н., Терк Б.Л. Установка утилизации тепла дымовых газов // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 8. – С. 29–31.
3. Галузов В.С. Утилизация теплоты дымовых газов // Энергия и менеджмент (Минск). – 2004. – № 6. – С. 44.
4. Кочугов Д.А. Использование вторичных энергоресурсов на тепловых электростанциях // Национальная библиотека Украины имени В.И. Вернадского, Киев. 2008. URL:

При температурах наружного воздуха от 0 до -20°C тепловая производительность установки колеблется в пределах $9,7...10,9 \text{ МВт}$. Приняв число часов с отрицательной температурой наружного воздуха равным 4000 ч/год , получим за год экономию в $40 \text{ ГВт}\cdot\text{ч}$ или 34400 Гкал тепла. Если принять стоимость тепла 800 р./Гкал , получим сокращение затрат на $27,5 \text{ млн р.}$ Получается, что при сумме капитальных вложений и текущих издержек в $13...14 \text{ млн р.}$ срок окупаемости такой установки значительно меньше одного года.

Наибольшая эффективность установки при использовании тепла для подогрева воздуха приточной вентиляции и воздушного отопления. Как показывают предварительные расчеты, срок окупаемости таких установок меньше одного отопительного сезона и уменьшается с его увеличением.

Выводы

1. Показано, что резервы повышения эффективности источников энергоресурсов, работающих на углеводородном топливе, в значительной мере заключаются в использовании теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.
2. Предложена технологическая схема установки по осушению дымовых газов, позволяющая использовать теплоту конденсации водяного пара дымовых газов для обогрева помещений подогретым воздухом и подачи его в котел без существенного снижения температуры уходящих сухих газов.
3. Установлено, что в промышленной установке при коэффициенте равновесности процесса конденсации водяных паров равном $0,8$ можно получить количество тепла на подогрев холодного воздуха, эквивалентное $10...15 \%$ тепловой мощности котла.
4. Показано, что эффективность промышленной установки зависит от возможности использования низкопотенциального тепла. Для регионов Сибири срок окупаемости капитальных вложений не превышает одного отопительного сезона.

http://www.nbu.gov.ua/Articles/OSPU/opu_99_1/2_6.htm (дата обращения: 15.03.2010).

5. Беспалов В.И., Беспалов В.В., Ковалев О.В., Ревин Е.А., Бобер Р.Е., Ципкин А.Н. Повышение эффективности работы ТЭС на углеводородном топливе // Теплофизические основы энергетических технологий: Матер. региональной научно-практ. конф. – 25–27 июня 2009 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 154–159.

Поступила 15.03.2010 г.